第28卷 第2期 2016年3月
腐蚀科学与防护技术
CORROSION SCIENCE AND PROTECTION TECHNOLOGY
Vol.28 No.2 Mar. 2016

专题介绍

燃煤锅炉烟气侧高温腐蚀研究进展

李 琰[1,2] 鲁金涛[1] 杨 珍[1] 朱 明[2] 谷月峰[1]

1. 西安热工研究院有限公司 国家能源清洁高效火力发电技术研发中心 西安 710032;
2. 西安科技大学材料科学与工程学院 西安 710054

摘要: 介绍了燃煤锅炉受热面烟气侧腐蚀的最新研究进展，着重讨论了不同部位合金的腐蚀特征及腐蚀机理，并进一步展望了锅炉烟气侧合金腐蚀的研究方向，提出了待澄清的若干问题，为开展燃煤锅炉高温腐蚀研究及针对锅炉腐蚀环境的材料设计和改进提供参考。

关键词: 燃煤锅炉 合金 高温 烟气侧腐蚀 腐蚀机理

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-6495(2016)02-0167-06

1 前言

锅炉受热面 (水冷壁、过热器、再热器和省煤器，又称锅炉“四管”) 为锅炉中负责回收燃煤烟气能量、加热蒸汽、实现能量转化的关键部件。受热面所遭受到的腐蚀主要来自炉管内部高温蒸汽氧化腐蚀和炉管外部因煤粉燃烧造成的烟气腐蚀。因锅炉设备结构材料、运行方式和燃烧煤种的差别，导致烟气侧高温腐蚀较为复杂。近年来报道锅炉事故中，由于烟灰 (气) 而引起的金属腐蚀 (氧化层剥落、点蚀、硫腐蚀、飞灰吹损和应力腐蚀等) 严重影响了锅炉运行的安全性、可靠性与经济性。

本文综述了锅炉受热面烟气侧高温腐蚀的最新研究进展，总结了受热面合金的腐蚀特征及腐蚀机理，为进一步开展燃煤锅炉高温腐蚀研究及针对锅炉腐蚀环境的材料设计和改进提供参考。

2 锅炉烟气侧腐蚀环境

燃煤锅炉烟气侧高温腐蚀与燃烧环境中的气体温度、气体成分、煤灰组成及煤粉颗粒的运动等诸多因素相关，其中煤灰 (Fe_2O_3，Na_2SO_4，K_2SO_4，$CaSO_4$，SiO_2 和 Al_2O_3 等) 和烟气 (H_2S，SO_2，SO_3，CO_x 和 NO_x 等) 是最主要的影响因素[1]。燃煤锅炉水冷壁所处温度较低，其服役环境中含有大量的活性硫原子和 H_2S 等还原性气体会造成水冷壁管材的严重腐蚀。随着受热面温度升高，低熔点复合硫酸盐形成并黏附在炉管外壁，腐蚀以复合硫酸盐为主导。研究发现煤灰中的Cl会显著加快腐蚀进程，其腐蚀机制还有待于继续研究。而锅炉尾部温度较低，烟气中 SO_3 与水蒸气反应生成硫酸，硫酸凝结在省煤器外壁腐蚀管管壁。现役超 (超) 临界锅炉受热面典型部位的服役环境见表1。

3 受热面合金高温腐蚀行为

3.1 水冷壁

水冷壁所处温度较低，所选用合金以碳钢或低合金钢为主。现役锅炉中水冷壁首选材料主要包括T22，T24，12CrMo，12Cr1MoV，15CrMo 和 20G 等碳钢或低合金钢。这类钢 Cr 含量一般小于 3%，因此其抗烟气腐蚀性能较差。

研究发现这一类材料的腐蚀产物具有相似的特征，腐蚀层为多层结构[2]，主要由疏松的 Fe_2O_3 和致密的 Fe_3O_4 组成，并伴有少量的内硫化物。文献报道，T22[3]，T23/T24[4]等低合金钢腐蚀层与之相似。由于Cr含量较低，合金表面难以形成致密的氧化层；随着服役温度、时间的增加，腐蚀层逐渐增厚致使氧化层与基体结合力下降，导致氧化层剥落。Manpreet 等[5]研究指出，增加T22表层Cr含量，腐蚀损失量由 10.576 mm/a 降低到 2.29 mm/a。张知翔等[6]通过对比 12Cr1MoV 和 T91 在模拟烟气中的高温腐蚀行为，指出高Cr含量的T91合金表面形成保护性 Cr_2O_3 膜，氧化膜阻碍腐蚀性气体深入，提高了合金耐蚀性能。因此，提高低合金钢耐蚀性的关键在于提高合金中Cr含量。

因煤种不同及煤粉燃烧程度的不同，水冷壁的局部燃烧环境会呈现出不同特征，进而影响合金的腐蚀过程。例如，T24在氧化性燃烧气氛中腐蚀层分两层，外层是疏松的 Fe_2O_3，内层是致密的 Fe_3O_4；在还原性燃烧气氛中腐蚀层分为3层，外层与内层

定稿日期: 2015-05-22
基金项目: 国家自然科学基金项目 (51301130 和 51401163)和华能集团科技项目资助
作者简介: 李琰，男，1990年生，硕士
通讯作者: 鲁金涛，E-mail: lujintao@tpri.com.cn，研究方向为电站金属材料高温腐蚀与防护
DOI: 10.11903/1002.6495.2015.111

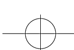


表1 超 (超) 临近锅炉受热面典型部位的服役环境

受热面部件	管壁温度 / ℃	烟气温度 / ℃	服役环境
水冷壁	400~500	450~595	所处温度相对较低，烟气中含有大量游离态的硫原子和还原性气体，如H_2S、CO_x、NO_x等。
过/再热器	560~650	650~1000	所处温度最高，在管壁外表面沉积了大量硫酸盐、氯化盐等熔盐。烟气中含有大量的SO_2、SO_3等腐蚀性气体。
省煤器	60~130	150~370	位于锅炉尾部，温度较低。烟气中SO_3与水蒸气在此处凝结形成硫酸，粘附在炉管外壁。

是致密的Fe_3O_4和Cr_2O_3混合层，中间是疏松的Fe_2O_3层；在混合型燃烧气氛中腐蚀层分为两层，以Fe和Cr的氧化物为主，并伴有少量硫化物[4]。但是，文献[6]指出影响合金耐蚀性能的关键因素仍是Cr含量，并指出在3种气氛中T91抗蚀性能均强于12Cr1MoV，经196 h腐蚀实验12Cr1MoV的腐蚀增重约为T91的1.3倍。

水冷壁管材的腐蚀速率不仅与合金成分、燃烧环境有关，还与合金表面沉积盐有关。沉积盐会破坏氧化膜的完整性，导致氧化膜破裂或脱落[7-9]。Jonsson等[10]和Lehmusto等[11]认为，沉积盐在合金表面发生交互作用形成低熔点的熔融态复合硫酸盐，并指出Cl^-可扩散穿过氧化膜与基体反应，降低了氧化膜与基体的结合力，从而加快了腐蚀速率。同时，文献[12]指出，当沉积盐中Cl^-达到1.3%时，腐蚀层增厚趋势十分显著，并且伴随剥落现象发生。

总体来说，由于Cr含量较低，碳钢或低合金表面很难形成致密的Cr_2O_3保护层，因而水冷壁管材的抗烟气腐蚀性能较差。但是，考虑到水冷壁所处温度较低、锅炉成本及经济效益等诸多因素，低合金钢可以满足水冷壁服役要求。

3.2 过热器和再热器

过/再热器管所处温度最高且服役环境最为复杂、恶劣，是锅炉关键部件。目前，过/再热器首选材料主要包括铁素体耐热钢和奥氏体耐热钢，如：T91，T92，Super304H，TP347H FG和HR3C等。

与水冷壁管相比，过/再热器合金中Cr含量提高，其抗烟气腐蚀性能得到大幅度提升。针对过/再热器合金，研究者们做了大量煤灰/烟气高温腐蚀实验进行探究。有研究表明，用于过/再热器的T92[13]、TP347H FG[14]和HR3C[15]等合金的腐蚀层同样为多层结构，外层是疏松多孔的Fe_2O_3层，内层是致密的Cr_2O_3和Fe_3O_4层，并且发现少量硫化物。研究发现，在不同温度下合金的腐蚀速率呈现先增加后降低的趋势[16]，极值出现在725 ℃左右[17,18]。造成此现象的主要原因为：氧化膜的生长受温度影响较大，在开始阶段温度较低氧化膜生长缓慢，因而腐蚀速率较快；随温度升高氧化膜生长速率加快，当氧化膜完全覆盖基体后会阻碍腐蚀性气体 (或原子) 的扩散通道，降低腐蚀速率。

煤种不同燃烧后对合金的腐蚀存在较大的不同，文献[19]指出，煤粉中硫含量越高，燃烧后会产生大量SO_2和SO_3等腐蚀性气体，会对合金造成严重的腐蚀。中川精和等[20]研究指出烟气中SO_2浓度在0.05%以下时，高Cr含量的合金几乎不发生腐蚀；随着SO_2浓度上升，在试样表面可观察到小的凹陷；当SO_2浓度达到0.25%时，腐蚀量会迅速增大。

较高的Cr含量可以使合金表面形成一层保护性氧化层。文献[21]研究指出，耐蚀性能好的合金其Cr含量一般都在22%以上，并且随着Cr含量增加，腐蚀层有明显减薄趋势[16]。目前，对于Cr含量还没有确定的下限值，但可以得知，Cr含量应该达到25%[14,22,23]，Paul和Clark[24]认为这一数值应达到30%。然而，并不是Cr含量越高，合金耐蚀性能就越好。当Cr含量过高时，会影响合金的加工性能、组织稳定性和强度等[25]。Dennis[26]研究指出，材料的耐腐蚀性能不仅与Cr含量有关还与合金中其它元素有关，例如，Mo会降低合金的耐蚀性能，尤其是在高硫环境中[19]。

尽管Cr含量是提高合金耐烟气腐蚀性能的关键，但是在锅炉运行过程中，含有大量碱金属氧化物/氯化物的煤灰会沉积在合金表面形成沉积盐。沉积盐会与氧化膜中Cr反应生成Na_2CrO_4和K_2CrO_4等尖晶石相，导致氧化膜破裂，加快腐蚀速率[27-31]；并且随沉积盐含量增加，腐蚀速率随之加快[32]。Yin等[33]和Natesan[17,34,35]研究表明，Cl^-会显著加速合金腐蚀速率，当气氛中无NaCl存在时，合金腐蚀增量变化不大；而向气氛中加300 mg/kg NaCl时，腐蚀增重十分显著。造成此结果的原因是多方面的：在高温下氯化盐会产生HCl和Cl_2，一方面HCl和Cl_2会与氧化膜反应将氧化膜溶解；另一方面还可以穿过氧化膜与基体反应，形成极具挥发性的$FeCl_2$。

目前关于过/再热器合金的腐蚀研究，普遍认为Cr含量是提高合金耐蚀性能的关键[36]，高Cr含量的奥氏体耐热钢，其强度和耐蚀性能可以满足现役锅炉服役要求。但是，近年来火力发电正向高参数、大功率方向发展，国内已经开展了700 ℃机组的建设计划。为此，只有强度和耐腐蚀性能更好的合金才能满足蒸汽温度和压力上的要求。因而，一些高温合金如：Inconel 740 (H)，Inconel 617 (CCA617)，Inconel 625等，引起了广泛的关注，已被视为下一代机组的首选材料。

这类合金的Cr含量都在20%以上，高的Cr含量可以在合金表面生长一层致密的Cr_2O_3膜[37,38]。文献[39]指出，在合成煤灰高温腐蚀环境中Inconel 740，CCA 617和GH 2984等3种高温合金失效形式以局部点蚀为主且点蚀区域腐蚀层为多层结构。赵双群等[40]认为，外层主要是由$CoCr_2O_4$，$Fe(Cr,Al)_2O_4$和$NiCr_2O_4$组成的疏松多孔的腐蚀层；中间层以致密的Cr_2O_3层为主并有少量的TiO_2和Al_2O_3；内层是Cr，Ni的硫化物层[41-44]。

虽然高温合金满足锅炉服役条件，但是，由于其成本过高，尚未在现役电站锅炉中有实际应用，目前的研究还主要集中在实验研究阶段。

3.3 省煤器

省煤器是利用烟气余热来加热给水的一种热交换器，其性能直接影响到锅炉正常运行。目前，用于省煤器的主要材料有15CrMo，20G等低碳钢或低合金钢，相关的腐蚀研究也以此开展。

省煤器合金的腐蚀失效主要源自硫酸露点腐蚀。根据文献[45]报道，硫酸露点温度主要取决于烟气中SO_3和水蒸汽的含量，随SO_3含量增加，硫酸露点温度呈上升趋势。当烟气中SO_3含量为4.5 mg/L和18.9 mg/L时，硫酸露点温度分别为124.38 ℃和142.92 ℃[46]。一般情况下认为，烟气中约有1%的SO_2转化成SO_3，在高温下，单纯的SO_2和SO_3几乎不会对管材造成腐蚀。但是，随着温度降低，烟气中SO_3与水蒸汽凝结形成H_2SO_4并粘附在管壁上造成管壁的严重腐蚀。胡传顺等[47]研究表明，发生露点腐蚀时，在炉管外壁上发生明显的局部腐蚀，最深腐蚀坑可达0.9 mm。通过对腐蚀产物分析得知，腐蚀产物中O，S和Fe的含量较高 (约为85%)[48]。刘正宁等[49]认为，腐蚀产物主要是浅黄色的$FeSO_4\cdot H_2O$。而Liang等[50]研究指出，当温度达到152 ℃时腐蚀产物中会有$Fe_2(SO_4)_3$的生成，随着H_2SO_4浓度增加和煤灰的冲刷，腐蚀层逐渐剥落，并在合金表面发现明显裂纹。

省煤器合金的腐蚀行为受多种因素影响，如：煤灰冲刷、硫酸浓度及温度等。Willian[51]研究表明，由于炉管两侧长期受到煤灰的冲刷，导致管壁两侧(腐蚀量达1.52 mm/a) 腐蚀程度比管壁顶部 (腐蚀量0.438 mm/a) 严重。陈浩等[52]研究指出，硫酸浓度在30%左右时腐蚀速率达到最大。除硫酸浓度外，温度也会显著影响腐蚀速率。Roozbeh等[53]指出，管壁的腐蚀速率与温度呈波动分布，腐蚀速率在110 ℃时达到最大值。

电化学腐蚀也是省煤器合金一种重要的失效形式。文献[54]研究表明，当硫酸蒸汽冷凝时，会在管壁表面形成许多微电池。此时，低电位的Fe发生氧化反应生成Fe^{2+}，随反应进行Fe^{2+}连续不断进入溶液中，导致新的表面暴露出来，致使腐蚀坑越来越深，直至穿孔。

省煤器位于锅炉烟气尾部，服役温度较低。因而，对合金的强度和耐蚀性能要求较低，一般的碳钢和低合金钢就能满足其服役要求。

4 腐蚀机理

4.1 硫化物腐蚀

赵虹等[55]认为，硫化物腐蚀主要是由煤中FeS_2高温分解产生的活性S引起，活性S沿晶界扩散穿过氧化层与基体反应生成FeS，生成的FeS同时被氧化 ($3FeS+2O_2 \rightarrow Fe_3O_4+3S$)，释放出的S继续向内部扩散渗透，重新形成硫化物。

发生硫化物腐蚀时，合金所处温度较低且服役气氛以还原性气氛为主。在锅炉主要受热面中水冷壁所处温度较低，其服役环境中含有大量的游离态活性硫原子和H_2S气体，同时低氮燃烧技术加速了还原性气体的产生。因此，硫化物腐蚀主要发生在水冷壁受热面处。

4.2 硫酸盐腐蚀

硫酸盐腐蚀主要发生在锅炉受热面的高温部位 (过/再热器)。在高温下，煤灰中碱金属氧化物(M_2O) 吸收烟气中SO_3形成低熔点的熔融态复合硫酸盐 (M_2SO_4)，M_2SO_4与合金表面氧化层发生溶解腐蚀反应，加速腐蚀进程及氧化层的破裂、剥落[56-58]。可能的腐蚀反应如下：

$$M_2O+SO_3 \rightarrow M_2SO_4 \tag{1}$$

$$3M_2SO_4+Fe_2O_3+3SO_3 \rightarrow 2M_3Fe(SO_4)_3 \tag{2}$$

$$3M_2SO_4+Cr_2O_3+3SO_3 \rightarrow 2M_3Cr(SO_4)_3 \tag{3}$$

4.3 氯化盐腐蚀

目前有关氯化盐腐蚀机理还未达成统一认识，Metsäjoki等[59]和Hanne等[60]认为，与硫酸盐腐蚀类似，氯化物熔盐可直接与氧化膜发生溶解腐蚀。Liu

等[61]则认为，氯化物高温分解、氧化产生的Cl_2主导腐蚀反应的进行，Cl_2气体扩散穿过氧化膜腐蚀基体合金。而Uusitalo等[62]则更倾向于氯化物的影响，认为多数氯化物都具有较低的熔点和高的蒸汽压，所以极易挥发，并指出生成的挥发性产物$FeCl_2$在不同气氛中对腐蚀层的影响是不同的，当气氛中O_2浓度高时，$FeCl_2$在挥发的过程中会被氧化形成形成疏松多孔的Fe_3O_4氧化层，降低了活性气态腐蚀介质向基体界面传输的阻力；而当O_2浓度偏低时，$FeCl_2$会穿过氧化膜挥发出去，导致氧化层极易剥落，从而加速了腐蚀进程。

4.4 露点腐蚀

锅炉尾部所处温度较低，腐蚀以硫酸露点腐蚀为主。Wang等[63]研究认为，露点腐蚀存在如下过程：

(1) 烟气中SO_3与水蒸气反应生成H_2SO_4：

$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 \quad (4)$$

(2) H_2SO_4蒸汽凝结在管壁上与金属反应：

$$H_2SO_4 + Fe \rightarrow FeSO_4 + H_2 \quad (5)$$

生成的$FeSO_4$具有吸潮性，吸收烟气中的水蒸气形成$FeSO_4 \cdot H_2O$，并在煤灰冲刷下极易剥落。Liang等[50]认为，当烟气温度达到152 ℃时，H_2SO_4可以直接与金属表面氧化物发生腐蚀反应：

$$Fe_2O_3 + 3H_2SO_4 \rightarrow 3H_2O + Fe_2(SO_4)_3 \quad (6)$$

除了上述主要的腐蚀类型以外，还存在飞灰吹损，高温钒腐蚀，火焰冲刷，结焦反应等多种腐蚀类型，各自的腐蚀机理也有一定的差异。因此，在判断受热面具体部位的腐蚀类型及机理的时候，需要更多的考虑到各种腐蚀行为的交互作用。

5 总结

根据现有研究报道可得出如下规律：受热面不同部位均有各自的主导腐蚀类型，腐蚀行为受到多种腐蚀因素交互作用；Cr对提高合金耐蚀性是十分有益的，随着Cr含量的增加合金耐蚀性能相应提高；涂层技术有望成为提高合金的耐蚀性能的有效途径。

目前有关锅炉受热面烟气侧高温腐蚀，研究者们做了大量的实验进行探究，但是依然存在一定的问题。针对目前研究中的不足，本文提出了锅炉烟气侧合金高温腐蚀进一步的研究方向和待澄清的若干问题。

(1) 不同煤种燃烧后对合金的腐蚀存在较大的不同，如燃烧低硫煤产生的腐蚀性气体较少，对炉管腐蚀量较小；而燃烧高硫煤会产生大量的腐蚀性气体，会对锅炉合金造成严重的腐蚀。目前的研究缺少不同煤种的比较，尤其是随着高硫含氯煤的开发使用。在低硫煤燃烧腐蚀理论的基础上，开展高硫煤腐蚀研究尤为重要。这也是在新型燃烧环境下，设计和开发锅炉合金的前提。

(2) 由于燃煤锅炉烟气侧的腐蚀受燃烧环境影响较大，各种腐蚀因素的协同作用及机理尚未有统一的认识。同时，锅炉管在服役过程中还受到较大的应力 (蒸汽压力、管道提拉等) 作用，合金在应力作用下的腐蚀研究尚未开展。

(3) 目前锅炉部件最重要的选材标准是合金的持久强度，而对合金寿命的预测基本上是基于大气环境中的持久强度实验，并未考虑到腐蚀介质因素的影响。因此，有关腐蚀介质对合金寿命预测模型的修正还有待进一步研究。

(4) 开展锅炉合金烟气腐蚀行为研究，除了要理解合金与环境介质的交互作用规律之外，更重要的是寻找合金改进的方法与途径。一方面可以用强度更高，耐蚀性能更好的高温合金来替代现役锅炉合金；另一方面通过对现役锅炉合金进行改进提高合金中Cr含量，来达到提高合金耐蚀性能的目的。因此，开展针对服役环境的合金改进研究尤为必要。

参考文献

[1] 赵双群, 谢锡善, Smith G D等. 粉煤燃烧环境中过热器管材的高温腐蚀 [J]. 特殊钢, 2003, 24(6): 36

[2] Dudziak T, Hussain T, Simms N J, et al. Fireside corrosion degradation of ferritic alloys at 600 ℃ in oxy-fired conditions [J]. Corros. Sci., 2014, 79: 184

[3] Li L C, Duan Y F, Cao Y. Field corrosion tests for a low chromium steel carried out at superheater area of a utility boiler with three coals containing different chlorine contents [J]. Fuel Proc. Technol., 2007, 88(4): 387

[4] Zhao Q X. High temperature corrosion of water wall materials T23 and T24 in simulated furnace atmospheres [J]. Chin. J. Chem. Eng., 2012, 20(4): 814

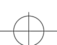
[5] Manpreet K, Harpreet S. Surface engineering analysis of detonation gun sprayed Cr_3C_2-NiCr coating under high temperature oxidation and oxidation erosion environments [J]. Surf. Coat. Technol., 2011, 206(2/3): 530

[6] 张知翔, 成丁南, 赵钦新等. 水冷壁材料在模拟烟气中的高温腐蚀研究 [J]. 材料工程, 2011, 4: 14

[7] Chandra K, Kain V, Dey G K. Failure of 2.25Cr-1Mo steel superheater tubes in a fluidized bed combustor due to fireside corrosion [J]. Mater. Charact., 2011, 62(1): 62

[8] Li L C, Zhu R Z, Gesmundo F. Hot corrosion of iron in the presence of salt mixture deposits containing NaCl and V_2O_5 at 600 ℃ [J]. Mater. Sci. Technol., 1996, 12(6): 445

[9] Manoj P, Gosia S B, Maier J, et al. Corrosion mechanism of alloy 310 austenitic steel beneath NaCl deposit under varying SO_2 concentrations in an oxy-fuel combustion atmosphere [J]. Energy Fuels, 2013, 27(10): 5699



[10] Jonsson T, Folkeson N, Svensson J E, et al. An ESEM in situ investigation of initial stages of the KCl induced high temperature corrosion of a Fe-2.25Cr-1Mo steel at 400 ℃ [J]. Corros. Sci., 2011, 53(6): 2233

[11] Lehmusto J, Yrjas P, Skrifvars B J, et al. High temperature corrosion of superheater steels by KCl and K_2CO_3 under dry and wet conditions [J]. Fuel Proc. Technol., 2012, 104: 253

[12] Skrifvars B J, Backman R, Hupa M, et al. Corrosion of superheater steel materials under alkali salt deposits. Part1: The effect of salt deposit composition and temperature [J]. Corros. Sci., 2008, 50(5): 1274

[13] Tanvir H, Syed A U, Simms N J. Fireside corrosion of superheater materials in coal/biomass co-fired advanced power plants [J]. Oxid. Met., 2013, 80(5/6): 529

[14] Luo W W, Yang R J, Wang Y T, et al. High temperature corrosion behaviors of the superheater materials [J]. Procedia Eng., 2012, 36: 212

[15] Syed A U, Simms N J, Oakey J E. Fireside corrosion of superheaters: Effects of air and oxy-firing of coal and biomass [J]. Fuel, 2012, 101: 62

[16] 李美栓. 金属的高温腐蚀 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001

[17] Natesan K. Fireside corrosion of alloys for combustion power plants [A]. 17th Annual Conference [C]. Baltimore Margland, 2003

[18] Hack H, Stanko G. Effects of fuel composition and temperature on fireside corrosion resistance of materials for advanced ultrasupercritical coal fired power plants [J]. Energy Mater., 2007, 2(4): 241

[19] Michael S G, Horst H, Greg S. Fireside corrosion resistance of proposed USC superheater and reheater materials: Laboratory and field test results [A]. 33th International Technical Conference [C]. Florida, 2008

[20] 中川精和, 吴蓓. 超超临界压力锅炉过热器管材的高温灰腐蚀 [J]. 锅炉技术, 1987: (4), 25

[21] Gagliano M, Hack H, Stanko G. Update on the fireside corrosion resistance of proposed advanced ultrasupercritical superheater and reheater materials: laboratory and field test results [A]. 34th Clear Conference [C]. Clearwater, 2009

[22] Gosia S B, Maier J, Scheffknecht G. Impact of oxy-fuel combustion on the corrosion behavior of advanced austenitic superheater materials [A]. 10th International Conference [C]. Amsterdam, 2010

[23] Hack H, Stanko G. Effects of fuel composition and temperature on fireside corrosion resistance of materials for advanced ultrasupercritical coal fired power plants [J]. Energy Mater., 2007, 2(4): 241

[24] Paul L, Clark G. Coal ash corrosion resistance of new chromium and chromium silicon alloys [A]. NACE Corrosion 2005 [C]. Houston Texas, 2005

[25] Zielinski A. Austenitic steels for boiler elements in USC power plants [J]. J. Achiev. Mater. Manuf. Eng., 2013, 57(2): 68

[26] Dennis K M. Coal ash corrosion resistant materials testing program: evaluation of first section removed, November 2001 [A]. 28th International Technical Conference [C]. Clearwater Florida, 2003

[27] Stein B G, Maier J, Scheffknecht G. Fireside corrosion during combustion considering various SO_2 contents [A]. 7th Thondheim CCS Conference [C]. Thondheim, 2014

[28] Enestam S, Tuiremo J, Makela K. Are NaCl and KCl equally corrosive on superheater materials of steam boilers [J]. Fuel, 2013, 104: 294

[29] Lehmusto J, Skrifvars B J, Yrjas P, et al. Comparison of potassium chloride and potassium carbonate with respect to their tendency to cause high temperature corrosion of stainless 304L steel [J]. Fuel Proc. Technol., 2013, 105: 98

[30] Pettersson J, Folkeson N, Johansson L G, et al. The Effects of KCl, K_2SO_4 and K_2CO_3 on the high temperature corrosion of a 304-type austenitic stainless steel [J]. Oxid. Met., 2011, 76(1/2): 93

[31] 成丁南, 张知翔, 赵钦新等. 5种电站锅炉过热器用材料高温腐蚀试验研究 [J]. 动力工程学报, 2012, 32(11): 891

[32] Simone C, Tommy V, Flemming J F, et al. Lab-scale investigation of deposit induced chlorine corrosion of superheater materials under simulated biomass firing conditions. Part 1: Exposure at 560 ℃ [J]. Energy Fuels, 2009, 23(7): 3457

[33] Yin J M. Corrosion behavior of TP316L of superheater in biomass boiler with simulated atmosphere and deposit [J]. Chin. J. Chem. Eng., 2009, 17(5): 849

[34] Natesan K, Park J H, Rink D L. Fireside corrosion of alloys for USC plant [A]. 19th Annual Conference [C]. Knoxville, 2005

[35] Natesan K, Park J H. Fireside and steamside corrosion of alloys for USC plants [J]. Int. J. Hydrogen Energy, 2007, 32(16): 3689

[36] Hussain T, Syed A U, Simms N J. Trends in fireside corrosion damage to superheaters in air oxy-firing of coal/biomass [J]. Fuel, 2013, 113: 787

[37] Peraldi R, Pint B A. Effect of Cr and Ni contents on the oxidation behavior of ferritic and austenitic model alloys in air with water vapor [J]. Oxid. Met., 2004, 61(5/6): 463

[38] Stein B G, Florez D M, Scheffknecht G. Nickel-base superalloys for ultrasupercritical coal fired power plants fireside corrosion. Laboratory studies and power plant exposures [J]. Fuel, 2013, 108: 521

[39] 鲁金涛, 谷月峰, 杨珍. 3种700 ℃级超超临界燃煤锅炉备选高温合金煤灰腐蚀行为 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(3): 205

[40] 赵双群, 谢锡善, Smith G D. 新型镍基高温合金在模拟燃煤锅炉环境中的腐蚀 [J]. 金属学报, 2004, 40(6): 659

[41] Zhao S Q, Xie X S, Smith G D. High corrosion of Inconel alloy740 in simulated environments for pulverized coal fired boiler [J]. Mater. Chem. Phys., 2005, 90(2/3): 275

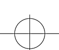
[42] 赵双群, 谢锡善, Smith G D. 新型Ni-Cr-Co高温合金在模拟燃煤环境中的高温腐蚀 [J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(3): 340

[43] Aung N N, Liu X B. Effect of temperature on coal ash hot corrosion resistance of Inconel 740 super alloy [J]. Corros. Sci., 2014, 8: 227

[44] Petterson J, Petterson C, Asteman H, et al. A pilot plant study of the effect of alkali salts on the initial stages of the high temperature corrosion of alloy 304L [A]. 6th International Symposium on High Temperature Corrosion and Protection of Materials [C]. Les Embiez, 2004

[45] Bahman Z N, Ali A. Accurate prediction of the dew points of acidic combustion gases by using an artificial neural network model [J]. Energ. Convers. Manage., 2011, 52(2): 911

[46] Blanco J M, Pena F. Increase in the boilers performance in terms



of the acid dew point temperature environmental advantages of replacing fuels [J]. Appl. Therm. Eng., 2008, 28(7): 777

[47] 胡传顺, 杨锦伟, 梁会军等. 余热锅炉省煤器管腐蚀原因分析 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005, 17(5): 366

[48] Mobin M, Malik A U, Al-Hajri M. Investigations on the failure of economizer tubes in a high pressure boiler [J]. J. Fail. Anal. Prev., 2008, 8(1): 69

[49] 刘正宁, 刘洋, 谭厚章等. 余热锅炉省煤器腐蚀机理的研究 [J]. 动力工程学报, 2010, 30(7): 508

[50] Liang Z Y, Zhao Q X. Failure analysis of spiral finned tube on the economizer [J]. Eng. Fail. Anal., 2013, 28: 208

[51] Liu W. Failure analysis on the economizer of a biomass fuel boiler [J]. Eng. Fail. Anal., 2013, 31: 101

[52] 陈浩, 苏莹莹, 王艳丽等. 15CrMo材质余热锅炉省煤器的腐蚀实验研究 [J]. 石油和化工设备, 2010, 13(2): 57

[53] Roozbeh S M, Mehrad M, Mohammad G, et al. Investigations of the failure in boilers economizer tubes used in power plants [J]. J. Mater. Eng. Perform., 2013, 22(9): 2691

[54] 梁学福, 高建苹. 省煤器锅炉腐蚀原因 [J]. 腐蚀与防护, 2012, 33 (10): 897

[55] 赵虹, 魏勇. 燃煤锅炉水冷壁烟侧高温腐蚀的机理及影响因素 [J]. 动力工程, 2002, 22(2): 1700

[56] Srivastava S C, Godiwalla K M, Banerjee M K. Fuel ash corrosion of boiler and superheater [J]. J. Mater. Sci., 1997, 32(4): 835

[57] 宋玉田, 王东衍, 朱兰芳. 热水锅炉水管烟侧的腐蚀探讨 [J]. 工业锅炉, 2001, 6: 48

[58] 齐慧滨, 郭英倬, 何东业等. 燃煤火电厂锅炉"四管"的高温腐蚀 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(2): 13

[59] Metsäjoki J, Huttunen S E, Lepisto T. Elevated temperature corrosion of uncoated and aluminized 9~12%Cr boiler steels beneath KCl deposit [J]. Fuel, 2014, 133: 173

[60] Hanne P N, Flemming J F, Kim D J. Lab-scale investigations of high temperature corrosion phenomena in straw fired boiler [J]. Energy Fuels, 1999, 13: 1114

[61] Liu S N, Liu Z D, Wang Y T, et al. A comparative study on the high temperature corrosion of TP347H stainless steel, C22 alloy and laser cladding C22 coating in coating in molten chloride salts [J]. Corros. Sci., 2014, 83: 396

[62] Uusitalo M A, Vuoristo P M J. High temperature corrosion of coatings and boiler steels below chlorine-containing salt deposits [J]. Corros. Sci., 2004, 46: 1311

[63] Wang Y G, Zhao Q X, Zhang Z C, et al. Mechanism research on coupling effect between dew point corrosion and ash deposition [J]. Appl. Therm. Eng., 2013, 54(1): 102

